

AM 真菌和水分条件对稀土尾矿堆中植物生长的影响

陈则友¹, 曹学章², 彭安萍¹, 荀志萌¹, 高彦征¹, 孔火良^{1*}

(1.南京农业大学土壤有机污染控制与修复研究所, 南京 210095; 2.环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要: 通过温室盆栽试验研究了不同水分处理下接种 3 种丛枝菌根 (AM) 真菌 (*Diversispora spurcum*, *Glomus aggregatum* 和 *Glomus constrictum*) 后对稀土矿砂中黑麦草 (*Lolium perenne* L.) 和狗牙根 (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.) 植物株高、地上和地下部分干重及植株内 Pb 和 Zn 含量的影响。结果表明: 不同水分处理下黑麦草和狗牙根与 AM 真菌均有一定的结合。在干旱胁迫 (W1 和 W2) 下, 接种 3 种 AM 真菌均提高了黑麦草的株高、地上和地下部分干重, 其中, 接种 *Glomus aggregatum* 促进作用最为显著, 重度干旱胁迫 (W1) 处理下接种后黑麦草株高、地上和地下部分干重比对照分别提高了 76.16%、202.86% 和 481.82%; 接种 *Glomus constrictum* 显著提高了狗牙根的株高、地上和地下部分干重, W1 处理下狗牙根接种后的株高、地上和地下部分干重比对照分别提高了 119.17%、290.63% 和 247.37%。接种 AM 真菌的植株内 Pb 和 Zn 含量与 AM 真菌种类、植物品种、水分处理及重金属性质等相关, 在 W1 处理下接种 *Glomus constrictum* 显著降低了黑麦草植株内 Pb 的含量, 而对 Zn 的含量影响不大; 而对于狗牙根, 在 W1 处理下接种 *Glomus constrictum* 显著增加了其 Pb 和 Zn 的含量。此外, 还测定了植物叶片丙二醛和脯氨酸含量, 结果显示接种 AM 真菌明显降低了干旱处理下黑麦草和狗牙根叶片丙二醛和脯氨酸含量, 表明接种 AM 真菌能有效提高植物的抗逆性。

关键词: 丛枝菌根; 干旱胁迫; 植物生长; 重金属; 稀土尾矿

中图分类号: S154.36 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2012)11-2101-07

Impacts of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Water Conditions on Plant Growth in Rare Earth Tailings

CHEN Ze-you¹, CAO Xue-zhang², PENG An-ping¹, XUN Zhi-meng¹, GAO Yan-zheng¹, KONG Huo-liang^{1*}

(1. Institute of Organic Contaminant Control and Soil Remediation, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences; State Environmental Protection Administration, Nanjing 210042, China)

Abstract: In a greenhouse pot experiment, ryegrass (*Lolium perenne* L.) and bermudagrass (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.) were grown in rare earth tailings under different water treatments, and the effects of inoculation with three arbuscular mycorrhizal (AM) fungi (*Diversispora spurcum*, *Glomus aggregatum* and *Glomus constrictum*) on plant growth, Pb and Zn contents were investigated. The results indicated that ryegrass and bermudagrass have a certain combination with different AM fungi. Under drought stress (W1 and W2), inoculation with *Glomus aggregatum* markedly increased the growth of ryegrass, and for severe drought stress (W1) treatment, the plant height, shoot and root dry weight of ryegrass were increased by 76.16%, 202.86% and 481.82% than those of controls, respectively. Inoculation with *Glomus constrictum* significantly increased the growth of bermudagrass, and for W1 treatment its plant height, shoot and root dry weight were increased by 119.17%, 290.63% and 247.37% than those of controls, respectively. The contents of Pb and Zn in plant had relations with water treatment, heavy metal properties and the varieties of AM fungi and plants, etc. W1 treatment inoculated with *Glomus constrictum* significantly reduced Pb content in ryegrass, while the Zn content was not affected; and for bermudagrass, W1 treatment inoculated with *Glomus constrictum* significantly increased the contents of Pb and Zn. In addition, this work also measured the leaf MDA and proline, and the results showed that inoculation with AM fungi dramatically reduced both leaf MDA and proline contents of two plants under drought treatment, which indicated that inoculations with AM fungi could improve the stress tolerance of plants effectively.

Keywords: arbuscular mycorrhizal; drought stress; plant growth; heavy metal; rare earth tailings

收稿日期: 2012-05-16

基金项目: 国家水专项 (2009ZX07211-001); 霍英东教育基金 (122045)

作者简介: 陈则友 (1987—), 男, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 主要从事金属矿山尾矿堆植被恢复方面的研究。E-mail: 2010103049@njau.edu.cn

* 通信作者: 孔火良 E-mail: hlkong@njau.edu.cn

稀土矿是一种重要的战略资源,但稀土矿开采的同时产生了大量的尾矿堆。据报道,每开采 1 t 稀土,需开挖 2000 t 原矿,产生 1400~1600 m³ 尾砂^[1]。加之在提取粗制稀土时,大量使用硫酸铵、硝酸铵等溶液冲洗,使稀土尾砂理化性质遭到严重破坏,尾砂堆积场地草木难生,水土流失极其严重,严重影响当地生态环境的安全。对稀土尾矿堆进行植被恢复已成为亟待解决的问题之一。稀土矿大多地理位置偏僻,尾矿砂中水分主要来源于降水,且其保水能力差,干旱是限制稀土尾砂堆上植被恢复的重要制约因素,因而提高稀土尾砂堆植物抗干旱胁迫的能力至关重要。此外,经测定稀土尾矿砂中 Pb 和 Zn 的含量均高于稀土矿当地红壤中的含量,由于尾矿砂处理不及时、长期堆积及雨水浸泡,导致重金属向周边土壤迁移,对其所处的生态环境和人类健康可造成十分严重的影响。

丛枝菌根(Arbuscular Mycorrhizal, AM)是广泛存在于土壤生态系统中的一类由植物根系与菌根真菌形成的共生体,几乎能与陆地上 80%以上高等植物形成丛枝菌根共生体。大量研究发现,菌根共生体的形成可以促进宿主植物对水分和氮、磷等矿质元素的吸收,提高宿主植物耐盐、耐旱、耐重金属胁迫的能力和胁迫生境中的存活力^[2-5],对被破坏生态系统植被恢复和重建有重要作用^[6-9]。近年来,利用菌根生物技术使植物充分适应干旱环境,以提高植物在干旱环境中的成活率和生产力已成为研究的热点领域^[10-11]。

本研究针对稀土尾矿堆干旱贫瘠,生态环境脆弱,植被难以建植等特点,选择两种常见的植物、3 种不同 AM 真菌,开展了稀土尾矿堆植被恢复的盆栽试验研究,研究在不同水分条件下,接种 AM 真菌对植物生长和植株内重金属 Pb 和 Zn 含量的影响,评价利用 AM 真菌提高稀土尾矿堆植物抗干旱胁迫的可行性,为利用 AM 真菌进行稀土尾矿堆植被恢复的工程应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试矿砂为稀土尾矿砂,采自江西省赣州市定南县东江源区水土流失重点治理一期工程砂头小流域

下庄综合治理区,基本理化性质见表 1。由表中数据可知,稀土尾矿砂呈微酸性,其有机碳、速效磷和速效氮等的含量极低,缺少植物正常生长发育所需的氮、磷、钾等营养元素,且稀土尾砂中粒径大于 50 μm 的成分占 80%以上,其粒间孔隙大,毛细管作用弱,通气透水性强,水分养分保持能力差。供试植物为黑麦草(*Lolium perenne* L.)和狗牙根(*Cynodon dactylon* (L.) Pers.),种子购于江苏省农科院。供试肥料为“Bio”生物有机肥,由南京农业大学研制。供试菌种为沾屑多样孢囊霉(*Diversispora spurcum*, D.s)、聚丛球囊霉(*Glomus aggregatum*, G.a)和缩球囊霉(*Glomus constrictum*, G.c),由北京市农林科学院植物营养与资源研究所丛枝菌根真菌种质资源库(BGC)提供。

1.2 试验方法

试验在南京农业大学温室内进行,采用上口直径 12 cm 的 PVC 塑料盆,每盆装基质 750 g,其中含矿砂 600 g,采自矿区当地的红壤 150 g,有机肥施用量按每千克基质施氮 0.15 g 计算。为了排除土著丛枝菌根和外来微生物对目的菌种的影响,称取足量风干的矿砂、红壤以及“Bio”生物有机肥进行灭菌处理(0.1 MPa, 2 h),混合均匀备用。

黑麦草和狗牙根均采用不接种菌剂(CK)、接种沾屑多样孢囊霉(D.s)、接种聚丛球囊霉(G.a)和接种缩球囊霉(G.c)4 种处理;每个处理设置 W1、W2 和 W3 三种水分处理方式,即基质含水量分别为基质总重量的 11%~12%、17%~18%和 22%~23%;菌种接种量按基质 2%计算,即 15 g·盆⁻¹。接种的菌剂为含有 AM 真菌孢子的砂土,其中每 15 克菌剂约含 1116 个孢子。接种处理菌种洒于基质表面以下 3 cm 处,种子播后覆 1 cm 厚的基质,不接种处理时以等量的灭菌基质代替接种菌剂^[12-14];黑麦草播种 30 粒·盆⁻¹、狗牙根播种 50 粒·盆⁻¹(播种前植物种子进行浸种催芽处理),每天通过称重法维持含水量保持在试验设计的范围内。所有处理均采用 3 个重复。

出苗后 1~2 周间苗,每盆留苗 10 株。正常浇水一个月后,再按各种水分处理浇水管理一个月。试验结束后,收获全部植株,分别测定菌根侵染率、植株株高、地上和地下部干重、叶片中丙二醛和脯氨酸含量、植株

表 1 供试稀土尾矿砂基本理化性质

Table 1 The basic physical chemistry properties of rare earth tailing particles in this work

有机碳/%	全氮/%	有效氮/ mg·kg ⁻¹	全磷/ mg·kg ⁻¹	有效磷/ mg·kg ⁻¹	全钾/%	速效钾/ mg·kg ⁻¹	CEC/ cmol(+)·kg ⁻¹	pH	机械组成/%		
									<2 μm	2~50 μm	50~2000 μm
0.18	0.01	17.67	15.33	0.38	6.56	17.33	5.04	5.39	2.48	11.86	85.67

(包括地上部分和地下部分)内 Pb 和 Zn 元素的含量。

1.3 测试分析与统计方法

植物收获后,用自来水仔细冲洗植物根,然后剪成 1 cm 长的根段,随机选取部分根段,采用 Phillpis 和 Hayman^[15]染色方法测定菌根侵染率;叶片丙二醛含量用硫代巴比妥酸比色法测定^[16];叶片脯氨酸含量用茚三酮比色法测定^[16];植株地上部及根系在 70 ℃ 的烘箱中烘干 48 h 后磨碎,过 0.5 mm 筛,在 500 ℃ 条件下干灰化,采用 ICP-OES(Optima 2000DC,Perkin-Elmer Co. USA)测定 Pb、Zn 元素含量。试验数据用 Origin8.0 和 SPSS13.0 进行制图和统计分析,平均值按 Duncan 新复极差分析,同一水分条件下接菌与对照进行了单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 AM 真菌和水分条件对植株生长量的影响

由表 2 可知,在接菌处理中,两种植物均发现菌根的侵染现象。黑麦草较狗牙根有更高的结合效率,

黑麦草平均侵染率为 31.6%,狗牙根仅为 9.12%。3 种 AM 真菌对黑麦草侵染率大小顺序为 G.a>D.s>G.c;而狗牙根为 G.c>D.s>G.a。不同水分处理对狗牙根菌根侵染率影响显著,随着基质水分的增加,狗牙根菌根侵染率显著增加。在 W1 处理下,接种 G.c 的狗牙根菌根侵染率仅 5.69%,而在 W3 处理下,接种 G.c 的狗牙根菌根侵染率增加到 23.96%,但就总体看两种植物侵染率都比较低。

对于黑麦草而言,在 W2、W1 处理下,与对照 CK 相比,接种 3 种 AM 真菌对黑麦草株高、地上和地下部分干重均表现出了显著性的促进作用,而 W3 处理下则无明显差异。3 种水分条件下,G.a 较 D.s 和 G.a 显示出了更好的促生效果。对于狗牙根,3 种水分处理下,与对照 CK 相比,G.c 均能显著增加植株株高、地上部分和地下部分干重。以 W1 处理为例,接种 G.c 时平均地上部分干重为 1.25 g,比对照高 2.91 倍,差异性分析表明两者差异达到了极显著水平($P<0.01$),表明重度水分胁迫下,接种 G.c 极显著促进了狗牙根

表 2 AM 真菌和水分胁迫对不同植株生长量的影响
Table 2 Effects of AM fungi and water stress on the growth of different plants

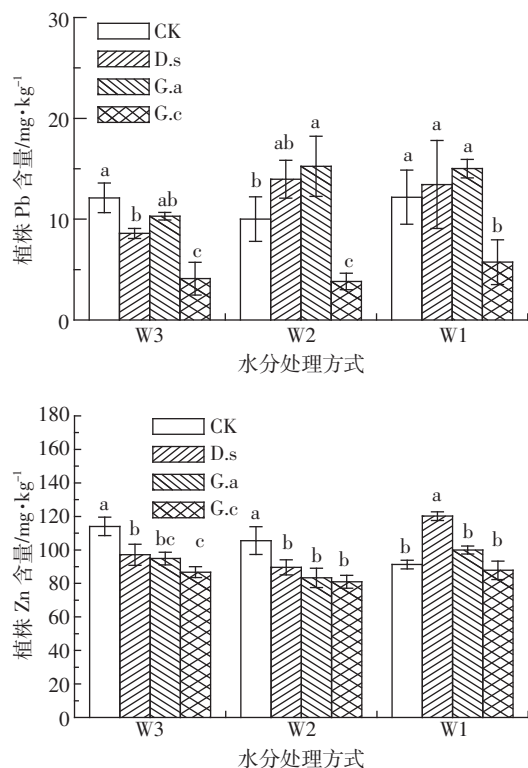
处理			株高/cm	地上部分干重/g	地下部分干重/g	侵染率/%
黑麦草	W3	CK	25.4±3.1a	1.1±0.1a	0.7±0.1a	0
		D.s	28.6±2.4a	1.2±0.3a	0.8±0.0a	33.5±4.2b
		G.a	30.2±1.7a	1.2±0.2a	0.8±0.1a	44.4±6.4a
		G.c	27.9±2.9a	1.2±0.2a	0.7±0.1a	25.9±4.5c
	W2	CK	18.0±2.2b	0.5±0.1b	0.4±0.0c	0
		D.s	25.4±0.6a	1.1±0.1a	0.7±0.0ab	32.1±7.8b
		G.a	28.9±1.2a	1.1±0.2a	0.7±0.0a	40.1±5.6a
		G.c	24.1±4.5a	0.9±0.1a	0.6±0.1b	23.1±7.0c
	W1	CK	15.8±3.4b	0.4±0.1b	0.1±0.0c	0
		D.s	24.6±0.9a	0.8±0.0a	0.4±0.1b	32.0±6.2b
		G.a	27.8±0.6a	1.1±0.1a	0.6±0.0a	38.0±1.3a
		G.c	24.1±2.9a	0.7±0.1a	0.4±0.1b	15.5±7.1c
狗牙根	W3	CK	24.3 ±1.8b	1.6±0.2b	0.7±0.0b	0
		D.s	26.6±2.3b	1.9±0.5ab	1.0±0.1a	19.4±2.6b
		G.a	25.9±1.3b	1.6±0.2b	0.8±0.0b	5.8±0.3c
		G.c	31.0±2.6a	2.2±0.2a	1.1±0.1a	24.0±8.7a
	W2	CK	10.4±1.6c	0.6±0.1b	0.2±0.0c	0
		D.s	14.8±0.5bc	0.8±0.4a	0.5±0.0b	8.1±4.1b
		G.a	13.1±2.4b	0.8±0.5ab	0.5±0.0b	4.6±1.7c
		G.c	18.6±2.4a	1.4±0.3a	0.7±0.0a	11.6±5.1a
	W1	CK	8.0 ±0.6c	0.3±0.1b	0.2±0.1c	0
		D.s	13.7±2.1b	0.6±0.2b	0.3±0.0b	1.6±0.4b
		G.a	11.6±2.7b	0.5±0.3b	0.2±0.1bc	1.4±0.2b
		G.c	17.5±1.4a	1.3±0.1a	0.7±0.0a	5.7±3.0a

注:D.s:接种沾屑多样孢囊霉;G.a:接种聚丛球囊霉;G.c:接种缩球囊霉;CK:未接种。同种植物同一列中不同字母表示差异达 5%显著水平。

地上部分的生长。然而,接种 D.s 和 G.a 与对照相比无显著差异性。

2.2 AM 真菌和水分条件对植株内 Pb 和 Zn 含量的影响

不同处理下黑麦草植株内 Pb 和 Zn 含量见图1。3种水分处理下,接种 G.c 均极显著地降低了黑麦草植株内的 Pb 含量($P<0.01$);而接种 D.s 和 G.a 的植株内 Pb 含量随水分处理方式不同而有所变化。如在 W3 处理下,与对照相比,接种 D.s 显著降低了植株内 Pb 含量($P<0.05$),但在 W1 和 W2 水分处理下,接种 D.s 对植株内 Pb 含量没有显著影响。对于 Zn,在 W3 和 W2 处理下,3种丛枝菌根均显著降低了植株内的 Zn 含量;在 W1 处理下,接种 D.s 却显著增加了 Zn 含量,但接种 G.a 和 G.c 与对照间无显著性差异。



同一水分处理下不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$),以下各图中其含义均相同

图1 3种水分处理下黑麦草 Pb、Zn 含量

Figure 1 The contents of Pb and Zn in ryegrass under three different water treatments

不同处理下狗牙根植株内 Pb 和 Zn 含量见图2。与 CK 相比,在 W3 处理下,接种 3 种丛枝菌根对于狗牙根植株内 Pb 含量无显著性差异($P>0.05$),而在干旱的 W2 和 W1 处理下,接种 3 种 AM 真菌均极显著增加了狗牙根植株内的 Pb 含量($P<0.01$),且随干旱胁迫强度的增大,其影响也增大。对于 Zn,3 种水分

处理下,仅接种 D.s 均显著增加了狗牙根植株内 Zn 含量;G.a 和 G.c 表现出了相似的规律,在 W3 处理下,与 CK 相比,两种丛枝菌根对于狗牙根植株内 Zn 含量无显著性差异($P>0.05$),而在干旱胁迫(W2 和 W1)下,接种 G.a 和 G.c 均显著增加了狗牙根植株内 Zn 含量。

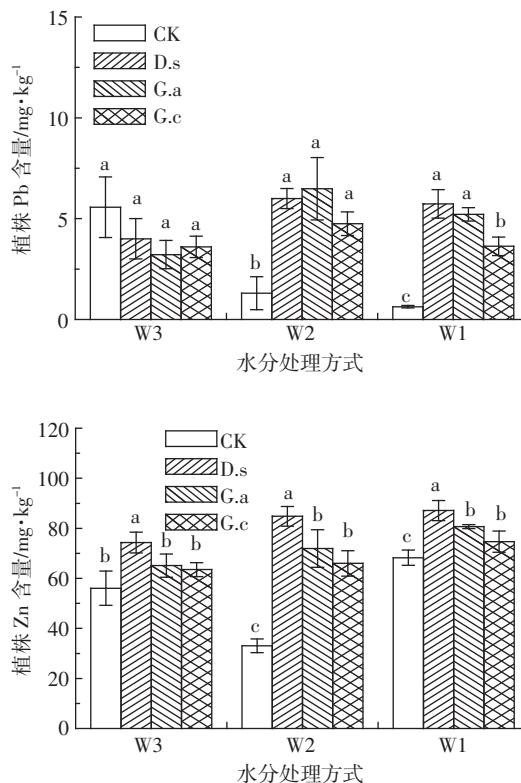


图2 3种水分处理下狗牙根 Pb、Zn 含量

Figure 2 The contents of Pb and Zn in bermudagrass under three different water treatments

2.3 AM 真菌和水分条件对植株叶片丙二醛和脯氨酸含量的影响

干旱胁迫可造成植物细胞膜系统的伤害,严重时可导致植物细胞死亡^[17]。丙二醛是细胞膜脂的过氧化产物,若植物体内丙二醛积累,则表明植物细胞膜过氧化作用加剧。干旱胁迫下,丙二醛含量随干旱强度的增加而升高,加速膜脂过氧化^[18]。脯氨酸也常作为植物抗逆性的一项生化指标,植物在正常条件下,游离脯氨酸含量很低,但遇到干旱、低温、盐碱等逆境时,游离脯氨酸便会大量积累,并且积累指数与植物的抗逆性有关。为了初步研究接种 AM 真菌对稀土尾矿堆植物抗逆性的影响,本实验测定了黑麦草和狗牙根叶片丙二醛和脯氨酸含量。

3 种水分处理下黑麦草和狗牙根丙二醛含量见

图3。随着基质水分的减少,植物叶片的丙二醛含量均有所增加。对照CK处理中黑麦草叶片丙二醛含量在W3处理下为 $32.7 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,在W1处理时则增加到 $49.5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (图3a),狗牙根叶片丙二醛含量由W3处理的 $17.4 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加到W1处理的 $53.1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (图3b),表明未接种AM真菌处理下干旱胁迫造成了供试植物叶片细胞膜的损伤。对于黑麦草(图3a),3种水分处理下,接种3种AM真菌的叶片丙二醛含量均低于对照,且差异显著($P<0.05$),叶片中丙二醛含量的大小顺序为G.a<D.s<G.c。对于狗牙根(图3b),接种AM真菌后,W3处理下,叶片中丙二醛的含量与CK处理无差异($P>0.05$);在W2和W1处理下,叶片丙二醛含量均低于对照,且差异显著($P<0.05$)。

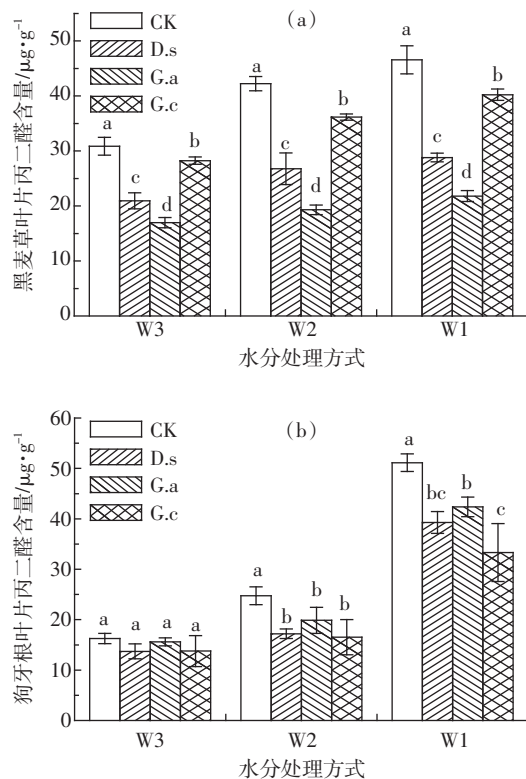


图3 3种水分处理下黑麦草(a)和狗牙根(b)丙二醛含量

Figure 3 Malondialdehyde contents of ryegrass(a) and bermudagrass(b) under three different water treatments

不同处理下植物叶片中脯氨酸含量见图4。随着水分的减少两种植物叶片中脯氨酸含量也呈增加趋势。对于黑麦草(图4a),不同水分处理下接种G.a和D.s均降低了其脯氨酸含量,其中接种G.a效果最为明显。接种G.c仅在W3处理下未降低黑麦草脯氨酸含量,在W1和W2处理下也可显著降低脯氨酸含量($P<0.05$)。对于狗牙根(图4b),在W3处理下,接种

AM真菌对叶片脯氨酸含量的影响并不显著;而在干旱胁迫(W2、W1)时,接种3种AM真菌均降低了狗牙根叶片脯氨酸含量,其中,接种G.c处理其脯氨酸含量降低效果最为显著。

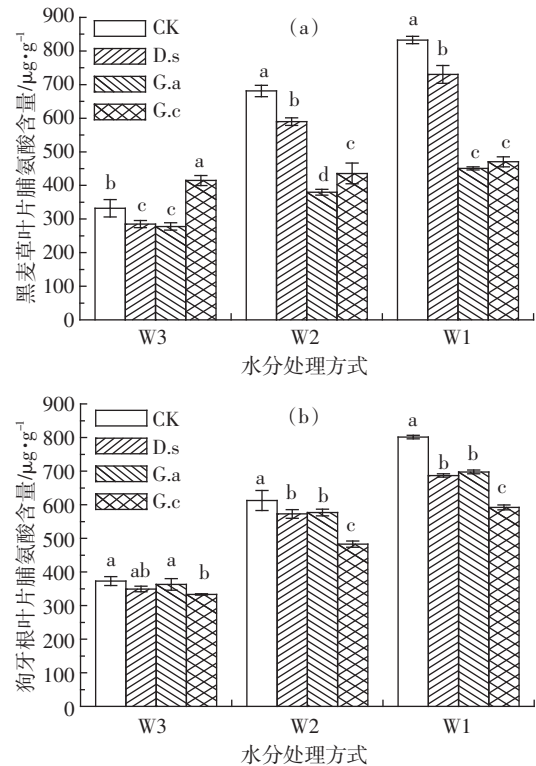


图4 3种水分处理下黑麦草(a)和狗牙根(b)脯氨酸含量
Figure 4 Leaf proline contents of ryegrass(a) and bermudagrass(b) under three different water treatments

3 讨论

本试验初步测定了稀土矿砂堆中AM真菌和水分胁迫对两种植物株高和干重等生长参数的影响,目的是筛选适合改良当地稀土尾矿砂的植物和AM真菌。由表2可知:一方面,黑麦草较狗牙根有更高的侵染率,这可能是因为黑麦草较狗牙根有更加发达的根系、而且多为须根,更利于不同丛枝菌根的侵染,这与刘润进和李晓林^[9]的研究结果一致,他们认为适于盆栽活体繁殖或保存AM真菌的宿主植物应选择根系发达的多年生草本植物或一年生植物;另一方面,两种植物侵染率总体上都不是很高,这可能是尾矿砂中多种不利因素抑制了侵染过程和真菌生长,或者是试验所用的真菌材料对稀土矿的适应性不是很强。表明非常有必要自尾矿上分离和筛选出耐性菌株,从而可能更大程度地发挥菌根的积极作用。

在干旱胁迫的W2和W1处理下,接种3种AM

真菌均提高了黑麦草的株高和干重,其中,接种 *Glomus aggregatum* 促进作用最为显著;干旱胁迫下,仅接种 *Glomus constrictum* 显著提高了狗牙根的株高和干重。这可能与 AM 真菌与植物的亲和力有关。Roldan-Fajardo^[20]研究表明,植物与丛枝菌根真菌之间的共生关系有一定的选择性,如苜蓿植物与当地菌株的功能兼容性高。本实验中 3 种 AM 真菌,G.a 对黑麦草的侵染率最高,而 G.c 对狗牙根的侵染率最高(表 2),表明 G.a 与黑麦草、G.c 与狗牙根之间的亲和力最大,因此,接种 G.a 对黑麦草生长的促进作用最为显著,而接种 G.c 对狗牙根生长的促进效果最佳。

植株内 Pb 和 Zn 含量的实验研究表明,在严重干旱 W1 下,接种 *Glomus constrictum* 显著降低了黑麦草植株内 Pb 的含量,而对 Zn 的含量影响不大;而对于狗牙根,接种 *Glomus constrictum* 却显著增加了其 Pb 和 Zn 的含量。不同水分处理下,接种 AM 真菌对植株内 Pb 和 Zn 含量的影响存在差异,造成这些差异可能的原因是接种不同 AM 真菌处理下其菌根侵染率、菌丝生长、植物营养元素运输效率等方面存在差异^[21],直接影响菌根共生体的生物学及生理特征,导致不同 AM 真菌对宿主植物内重金属含量的影响存在差异^[22]。此外,AM 真菌对植物吸收重金属的影响还受宿主植物种类、重金属种类、基质理化性质、农业管理措施等多种因素的影响^[23]。

本研究表明,与对照相比,在干旱胁迫(W2、W1)下,接种 3 种 AM 真菌均明显降低了黑麦草和狗牙根叶片丙二醛和脯氨酸含量,植物叶片丙二醛和脯氨酸含量的变化趋势与各水分处理下接种 AM 真菌对植物生长的影响规律基本一致,通过植物叶片丙二醛和脯氨酸含量的变化进一步验证了接种 AM 真菌对植物抗干旱胁迫的影响。这与吴强盛等^[24]的研究结果一致,接种 AM 真菌的植株受到水分胁迫的强度较未接种植株的要轻,也可以说,接种 AM 真菌改善了植株水分代谢,有效地减轻植物受胁迫的程度。因此,无需宿主植物合成更多的丙二醛和脯氨酸进行渗透保护,进而提高植物对干旱胁迫的抗逆性。

4 结论

(1)黑麦草和狗牙根与不同 AM 真菌均有一定的结合,不同水分处理下,*Glomus aggregatum* 对黑麦草的侵染率最高,而 *Glomus constrictum* 对狗牙根的侵染率最高,但总体上两种植物侵染率都较低。

(2)在干旱胁迫(W2 和 W1)下,接种 3 种 AM 真

菌均提高了黑麦草的株高和干重,其中,接种 *Glomus aggregatum* 促进作用最为显著,而仅接种 *Glomus constrictum* 才能显著提高狗牙根的株高和干重;在 W3 处理下,接种 AM 真菌对黑麦草和狗牙根的株高和干物质积累量没有显著影响。

(3)在严重干旱(W1)下,接种 *Glomus constrictum* 显著降低了黑麦草植株内 Pb 的含量,而对 Zn 的含量影响不大;而对于狗牙根,接种 *Glomus constrictum* 却显著增加了其 Pb 和 Zn 的含量。

(4)在干旱胁迫(W2 和 W1)下,接种 AM 真菌均明显降低了黑麦草和狗牙根叶片丙二醛和脯氨酸含量,有效提高了稀土尾矿堆植物的抗逆性。

参考文献:

- [1] 李德荣,王海辉,董闻达,等. 百喜草改良稀土尾砂和风化稀土矿砂理化性质的研究[J]. 江苏农业科学, 2004(2): 92-94.
LI De-rong, WANG Hai-hui, DONG Wen-da, et al. Study on rare earth tailing amelioration and physical chemistry properties of weathering rare earth tailing using Bahia Grass[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2004 (2): 92-94.
- [2] 韩冰,郭世荣,贺超兴,等. 丛枝菌根真菌对盐胁迫下黄瓜植株生长、果实产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 154-158.
HAN Bing, GUO Shi-rong, HE Chao-xing, et al. Effects of arbuscular mycorrhiza fungi (AMF) on the plant growth, fruit yield, and fruit quality of cucumber under salt stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(1): 154-158.
- [3] 贺学礼,高露,赵丽莉. 水分胁迫下丛枝菌根 AM 真菌对民勤绢蒿生长与抗旱性的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(4): 1029-1037.
HE Xue-li, GAO Lu, ZHAO Li-li. Effects of AM fungi on the growth and drought resistance of *Seriphidium minchinense* under water stress [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(4): 1029-1037.
- [4] 徐静,董宽虎,高文俊,等. 丛枝菌根真菌提高植物耐盐能力的作
用机制[J]. 草业与畜牧, 2010(6): 5-8.
XU Jing, DONG Kuan-hu, GAO Wen-jun, et al. Mechanism of arbuscular mycorrhizal fungi in alleviation of salt stress[J]. *Prataculture & Animal Husbandry*, 2010(6): 5-8.
- [5] 肖艳平,尹睿,沈生元,等. 丛枝菌根真菌在植物修复砷污染土壤中的作用[J]. 土壤, 2010, 42(2): 171-177.
XIAO Yan-ping, YIN Rui, SHEN Sheng-yuan, et al. Roles of arbuscular mycorrhizal in plant remediation of arsenic-contaminated soil [J]. *Soils*, 2010, 42(2): 171-177.
- [6] 毕银丽,刘银平,黄霄羽,等. 丛枝菌根对尾矿环境的生态修复作用[J]. 科技导报, 2008, 26(7): 25-29.
BI Yin-li, LIU Yin-ping, HUANG Xiao-yu, et al. Environmental effects of tailing and phytoremediation with arbuscular mycorrhiza[J]. *Science & Technology Review*, 2008, 26(7): 25-29.
- [7] Noyd R K, Pfleger F L, Norland M R. Field responses to added organic matter, arbuscular mycorrhizal fungi, and fertilizer in reclamation of

- taconite iron ore tailing[J]. *Plant and Soil*, 1996, 179: 89–97.
- [8] 杜善周, 毕银丽, 吴王燕, 等. 丛枝菌根对矿区环境修复的生态效应[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 113–116.
- DU Shan-zhou, BI Yin-li, WU Wang-yan, et al. Ecological effects of arbuscular mycorrhizal fungi on environmental phytoremediation in coal mine areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(4): 113–116.
- [9] Cuenca G, Lovera M. Vesicular-arbuscular mycorrhizal in disturbed and revegetated sites from La Gran Sabana, Venezuela[J]. *Canadian Journal of Botany*, 1992, 70(1): 73–79.
- [10] Ruiz-Sánchez M, Aroca R, Muñoz Y, et al. The arbuscular mycorrhizal symbiosis enhances the photosynthetic efficiency and the antioxidative response of rice plants subjected to drought stress[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2010, 167: 862–869.
- [11] Celebia S Z, Demir S, Celebi R, et al. The effect of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) applications on the silage maize (*Zea mays* L.) yield in different irrigation regimes[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46: 302–305.
- [12] Chen B, Roos P, Zhu Y G, et al. Arbuscular mycorrhizas contribute to phytostabilization of uranium in uranium mining tailings[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2008, 99: 801–810.
- [13] Clark R B, Zeto S K, Zobel R W. Arbuscular mycorrhizal fungal isolate effectiveness on growth and root colonization of *Panicum virgatum* in acidic soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31: 1757–1763.
- [14] Wu Q, Xia R. Arbuscular mycorrhizal fungi influence growth, osmotic adjustment and photosynthesis of citrus under well-watered and water stress conditions[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2006, 163: 417–425.
- [15] Ransome L S, Dowdy R H. Soybean growth and boron distribution in a sandy soil amended with scrubber sludge[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1987, 16(2): 171–175.
- [16] 耿彬. 植物对水分胁迫响应中菌根的作用[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- GENG Bin. The effects of arbuscular mycorrhizal fungi in the response of plant to soil drought stress[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [17] 白志英, 李存东, 吴同燕, 等. 干旱胁迫条件下小麦旗叶酶活性和丙二醛含量的染色体定位[J]. 植物遗传资源学报, 2009, 10(2): 255–261.
- BAI Zhi-ying, LI Cun-dong, WU Tong-yan, et al. Chromosomal control on flag leaf enzyme activity and mda content under drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2009, 10(2): 255–261.
- [18] 陈少裕. 膜脂过氧化对植物细胞的伤害[J]. 植物遗传资源学报, 1991, 27(2): 84–90.
- CHEN Shao-yu. Injury of membrane lipid peroxidation to plant cell[J]. *Plant Physiology Communications*, 1991, 27(2): 84–90.
- [19] 刘润进, 李晓林. 丛枝菌根及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1–224.
- LIU Run-jin, LI Xiao-lin. Arbuscular mycorrhizal fungi and the application[M]. Beijing: Science Press, 2000: 1–224.
- [20] Roldan-Fajardo B E. Effect of indigenous arbuscular mycorrhizal endophytes on the development of six wild plants colonizing a semi-arid area in south-east Spain[J]. *New Phytologist*, 1994, 127: 115–121.
- [21] Dodd J C, Boddington C L, Rodriguez A, et al. Mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) from different genera: Form, function and detection[J]. *Plant and Soil*, 2000, 226(2): 131–151.
- [22] 黄晶, 凌婉婷, 孙艳娣, 等. 丛枝菌根真菌对紫花苜蓿吸收土壤中镉和锌的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(1): 99–105.
- HUANG Jing, LING Wan-ting, SUN Yan-di, et al. Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on the uptake of cadmium and zinc by alfalfa in contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(1): 99–105.
- [23] Turnau K, Mesjasz-Przybyłowicz J. Arbuscular mycorrhiza of *Berkheya coddii* and other Ni-hyperaccumulating members of Asteraceae from ultramafic soils in South Africa[J]. *Mycorrhiza*, 2003, 13(4): 185–190.
- [24] 吴强盛, 夏仁学. 水分胁迫下丛枝菌根真菌对枳实生苗生长和渗透调节物质含量的影响[J]. 植物生理与分子生物学报, 2004, 30(5): 583–588.
- WU Qiang-sheng, XIA Ren-xue. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth and osmotic adjustment matter content of trifoliolate orange seedling under water stress[J]. *Acta Photophysiological Sinica*, 2004, 30(5): 583–588.